

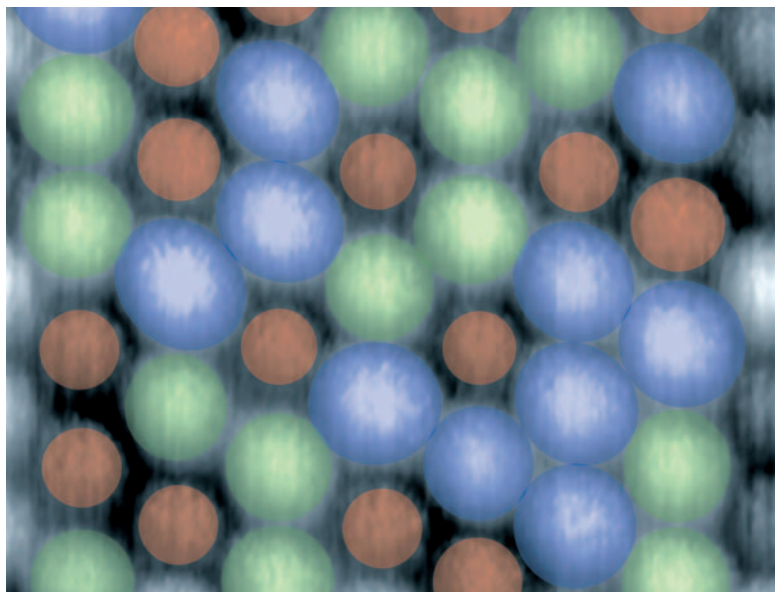
Ein atomarer Fingerabdruck

Atome auf einem Substrat lassen sich unter gewissen Bedingungen identifizieren, indem man mithilfe der Rasterkraftmikroskopie die Bindungskräfte misst.

1) Die Spitzenkonfiguration wurde durch bewusst herbeigeführtes leichtes Berühren der Probe mit der Spitze hervorgerufen.

Die Rastertunnel- und die Rasterkraftmikroskopie sind aus dem heutigen Laboralltag nicht mehr wegzudenken. Sie erlauben es nicht nur, Oberflächen mit atomarer Auflösung abzubilden, sondern sogar einzelne Atome zu manipulieren. Mit der Rastertunnelmikroskopie lassen sich elektrisch leitfähige Oberflächen analysieren, indem eine scharfe Spitze die Oberfläche abtastet. Der Abstand der Spitze wird dabei durch einen Regelkreis eingestellt, der den Tunnelstrom zwischen der Spitze und der auf einem anderen elektrischen Potential liegenden Probe als Regelsignal nutzt. Im Gegensatz dazu dient bei der Rasterkraftmikroskopie die Kraft zwischen Spitze und Probe als Regelsignal, sodass sich mit ihr auch Isolatoroberflächen untersuchen lassen. Neben der bloßen Abbildung liefern diese Instrumente weitere Informationen über Oberflächen sowie adsorbierte Atome und Moleküle. Die Rastertunnelspektroskopie, also die ortsaufgelöste Analyse des Tunnelstroms als Funktion der angelegten Tunnelspannung, ermöglicht die Identifikation und Sortierung chemischer Elemente [1] und Isotope [2]. Die tunnelnden Elektronen können nämlich inelastisch gestreut werden und die dabei auftretenden Energieunterschiede lassen sich charakteristischen und element-spezifischen Schwingungsmoden zuordnen.

Nach der Überwindung einiger experimenteller Schwierigkeiten konkurriert die Rasterkraftmikroskopie inzwischen mit der Rastertunnelmikroskopie, zumal sie nicht auf die Untersuchung leitender Oberflächen beschränkt ist. Aus diesem Grund wird mit Hochdruck daran gearbeitet, mit ihrer Hilfe ebenfalls einzelne Atome chemisch zu identifizieren. Die Messung der Bindungskräfte als Funktion des Abstandes zwischen Spitze und Probe erlaubt zwar Rückschlüsse über die Art der Bindung. Dabei



Rasterkraftmikroskopieaufnahme eines Siliziumsubstrats, dessen Oberfläche aus Silizium- (rot), Zinn- (blau) und Bleiatomen (grün) aufgebaut ist. Eine che-

mische Identifizierung ist durch die Bestimmung der maximalen anziehenden Kraft zwischen Oberflächenatom und Spitze möglich.

treten jedoch zwei Schwierigkeiten auf: Erstens wird die Kraft zwischen der Spitze eines Rasterkraftmikroskops und einer Oberfläche nicht nur vom vordersten Spitzenatom und dem ihm nächsten Probenatom verursacht, sondern es wirken auch Kräfte größerer Reichweite. Zweitens hängt die Kraft zwischen dem Spitzenatom und dem Oberflächenatom auch von der Orientierung der rückwärtigen Bindungen des Spitzenatoms ab [3]. Eine nominell gleiche Spitze – beispielsweise aus Silizium – kann daher unterschiedliche Werte für die absolute Kraft liefern.

Entscheidendes Substrat

Diese Schwierigkeiten haben nun Experimentalphysiker an der Universität Osaka – unterstützt durch theoretische Physiker aus Madrid und Prag – überwunden [4]. Das erste Problem haben sie mithilfe einer Substratoberfläche gelöst, auf der verschiedene chemische Elemente in ähnlicher Weise eingebunden sind, sodass sie sich insbesondere auf gleicher Höhe befanden und damit die langreichweitigen Kräfte für diese Atompositionen iden-

tisch sind. Sie wählten dabei ein Siliziumsubstrat, dessen oberste Atomlage aus etwa gleich vielen Blei-, Zinn- und Siliziumatomen bestand. Die Höhe der Atome gibt allerdings noch keinen Aufschluss über ihre chemische Identität, da das Rasterkraftmikroskop nicht die „wahre“ Höhe einer atomaren Landschaft abbildet, sondern nur eine „scheinbare“ Höhe der Atome, also eine Karte der Oberfläche bei konstanter Kraft. Ein sehr kleines Oberflächenatom, das die Spitze jedoch stark anzieht, erscheint daher sehr groß. Zudem zeigte sich im Experiment, dass die scheinbare Höhe auch von den Nachbaratomen abhing.

Durch die Messung der Kräfte über den Atompositionen als Funktion des Abstandes lassen sich die chemischen Elemente voneinander unterscheiden. Zwar hängen die absoluten Kräfte stark vom Zustand der Spitze ab und können nicht reproduzierbar gemessen werden, die relativen Kräfte zeigen jedoch eine elementspezifische Abhängigkeit. Die Analyse von hunderten von gemessenen Kraftkurven, bei denen die atomare Konfiguration der Spit-

Oscar Custance

Prof. Dr. Franz J. Gießibl, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, Universitätsstraße 31, 93053 Regensburg

ze leicht verschieden war,¹⁾ belegte, dass sich die maximale attraktive Kraft zwischen Spitze und Oberfläche stets für Silizium als Oberflächenatom ergab. Für ein Zinnatom betrug die Kraft verglichen mit Silizium nur etwa 80 % und für Blei etwa 65 %. Da sich das gleiche Verhältnis der Kräfte auch für andere Spitzenkonfigurationen und -atome findet, bildet es somit eine Art Kraft-Fingerabdruck für das untersuchte Atom. Der Vergleich der experimentell beobachteten Kraftkurven mit Dichtefunktionalrechnungen ermöglicht schließlich die Identifikation der drei chemischen Spezies. Dank einer hochstabilen, elektronischen Temperaturdriftkompensation gelang es sogar, die Experimente bei Raumtemperatur durchzuführen, obwohl die für Spektroskopieexperimente notwendige Stabilität üblicherweise nur bei sehr tiefen Temperaturen zu erreichen ist.

Die Arbeit von Sugimoto und Kollegen hat eindrucksvoll gezeigt, dass sich verschiedene chemische Elemente durch die Analyse

der Bindungskräfte mithilfe der Rasterkraftmikroskopie unterscheiden lassen. Dies ist allerdings nicht für beliebige Atome auf beliebigen Oberflächen möglich, da die Variation der langreichweitigen Kräfte auf rauen Oberflächen die Variation der chemischen Kräfte überdecken würde und darüber hinaus bestimmte Stabilitätsanforderungen erfüllt sein müssen. Die bisherigen Erkenntnisse dürften sich jedoch auch auf komplexere Systeme und Isolatoroberflächen übertragen lassen, wenn es mit einer Kombination geeigneter experimenteller Methoden gelingt, die langreichweitigen Kräfte zu unterdrücken.

Franz J. Gießibl

- [1] B. C. Stipe, M. A. Rezaei und W. Ho, *Science* **280**, 1732 (1998)
- [2] A. J. Heinrich, C. P. Lutz, J. A. Gupta und D. M. Eigler, *Science* **298**, 1381 (2002)
- [3] S. Hembacher, F. J. Giessibl und J. Mannhart, *Science* **305**, 380 (2004)
- [4] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Pérez, S. Morita und Ó. Custance, *Nature* **446**, 64 (2007)

SONNENAUFGANG FÜR SONNENFORSCHUNG

Bilder mit faszinierenden und bislang nicht gekannten Details liefert seit kurzem die internationale Sonnenmission Hinode (japanisch: Sonnenaufgang). Die Instrumente an Bord – zwei Teleskope für sichtbares bzw. Röntgenlicht sowie ein Spektrometer für den extremen UV-Bereich – beobachten seit vergangenen Herbst ununterbrochen und mit hoher Auf-

lösung die Sonne und ihre Atmosphäre. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Magnetfeld der Sonne wesentlich turbulenter und dynamischer ist als bislang vermutet. Das mit dem optischen Teleskop aufgenommene Bild zeigt das heiße Plasma und damit den Verlauf des Magnetfelds über einem Sonnenfleck (vgl. *Physik Journal*, März 2007, ab S. 31).

